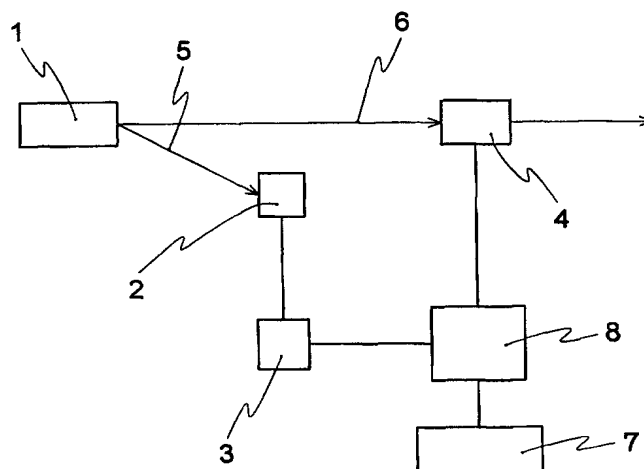


<b>(51) 国際特許分類7</b> <b>G02F 1/39, H04L 9/38, 9/08, H04B 10/00</b>	<b>A1</b>	<b>(11) 国際公開番号</b> <b>WO00/62123</b>  <b>(43) 国際公開日</b> 2000年10月19日(19.10.00)
<b>(21) 国際出願番号</b> PCT/JP99/06245  <b>(22) 国際出願日</b> 1999年11月10日(10.11.99)  <b>(30) 優先権データ</b> 特願平11/104608      1999年4月12日(12.04.99)      JP  <b>(71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について)</b> 三菱電機株式会社 (MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA)[JP/JP] 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 Tokyo, (JP) <b>(72) 発明者 ; および</b> <b>(75) 発明者 / 出願人 (米国についてのみ)</b> 竹内繁樹(TAKEUCHI, Shigeki)[JP/JP] 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo, (JP) <b>(74) 代理人</b> 朝日奈宗太, 外(ASAHINA, Sohta et al.) 〒540-0012 大阪府大阪市中央区谷町二丁目2番22号 NSビル Osaka, (JP)		<b>(81) 指定国</b> AU, CA, CN, KR, NO, SG, US, 欧州特許 (BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, IT, NL, SE)  <b>添付公開書類</b> 国際調査報告書

**(54) Title: SINGLE-PHOTON-EMISSION APPARATUS**

**(54) 発明の名称**    単一光子発生装置



**(57) Abstract**

A single-photon-emission apparatus comprises a source for generating a pair of photons including a signal photon and an idler photon that are mutually correlated in time of generation; a photon detector for detecting the incidence of an idler photon; a clock generator; a gate controller for turning on and off a gate less than a predetermined time in a clock-defined period; and a gate adapted to turn on and off depending on the signal from the gate controller.

(57)要約

シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えた。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

AE アラブ首長国連邦	DM ドミニカ	KZ カザフスタン	RU ロシア
AG アンティグア・バーブーダ	DZ アルジェリア	LC セントルシア	SD スーダン
AL アルバニア	EE エストニア	LI リヒテンシュタイン	SE スウェーデン
AM アルメニア	ES スペイン	LK スリ・ランカ	SG シンガポール
AT オーストリア	FI フィンランド	LR リベリア	SI スロヴェニア
AU オーストラリア	FR フランス	LS レソト	SK スロヴァキア
AZ アゼルバイジャン	GA ガボン	LT リトアニア	SL シェラ・レオネ
BA ボスニア・ヘルツェゴビナ	GB 英国	LU ルクセンブルグ	SN セネガル
BB バルバドス	GD グレナダ	LV ラトヴィア	SZ スワジランド
BE ベルギー	GE グルジア	MA モロッコ	TD チャード
BF ブルキナ・ファソ	GH ガーナ	MC モナコ	TG トーゴ
BG ブルガリア	GM ガンビア	MD モルドヴァ	TJ タジキスタン
BJ ベナン	GN ギニア	MG マダガスカル	TM トルクメニスタン
BR ブラジル	GR ギリシャ	MK マケドニア旧ユーゴスラヴィア共和国	TR トルコ
BY ベラルーシ	GW ギニア・ビサオ	ML マリ	TT トリニダード・トバゴ
CA カナダ	HR クロアチア	MN モンゴル	TZ タンザニア
CF 中央アフリカ	HU ハンガリー	MR モーリタニア	UA ウクライナ
CG コンゴ	ID インドネシア	MW マラウイ	UG ウガンダ
CH スイス	IE アイルランド	MX メキシコ	US 米国
CI コートジボアール	IL イスラエル	MZ モザンビーク	UZ ウズベキスタン
CM カメルーン	IN インド	NE ニジェール	VN ヲトナム
CN 中国	IS アイスランド	NL オランダ	YU ユーゴスラヴィア
CR コスタ・リカ	IT イタリア	NO ノールウェー	ZA 南アフリカ共和国
CU キューバ	JP 日本	NZ ニュー・ジーランド	ZW ジンバブエ
CY キプロス	KE ケニア	PL ポーランド	
CZ チェコ	KG キルギスタン	PT ポルトガル	
DE ドイツ	KP 北朝鮮	RO ルーマニア	
DK デンマーク	KR 韓国		

## 明 細 書

### 単一光子発生装置

#### 技術分野

本発明は、光子一つずつに情報を載せることで盗聴者の発見を可能にする伝送システムである量子暗号通信システムなどに用いる光源に関するものである。

#### 背景技術

量子暗号通信システムでは、光子一つずつに情報を載せることで、量子力学的な原理により盗聴者の発見を可能にする。しかし、もし同じ情報を2つ以上の光子に載せてしまえば、盗聴者によってそれらの光子の一部を利用され、盗聴者の存在を検出できない可能性がある。このように、理想的には最大でも1つの光子しか含まないパルスを利用する必要がある。このようなパルスとしては、1パルスあたりの光子の平均数 $\mu$ を約0.1になるように、レーザー光源からの光を減衰器によって減衰することが一般に行われている。このようにすることで、2つ以上の光子がパルス中に含まれる確率を減少できる。しかしパルス中に1つの光子が含まれている確率も0.1程度に減少することになる。つまり、 $\mu = 0.1$ の場合、10回に1度程度しか、実際に伝送が行われないことになる。

このような方法を改善する従来の技術の1例として、特表平8-505019号公報の、「量子暗号を使用したキー分配システムおよび方法」に記載されているものについ

て、図 9 を用いて説明する。図 9 において、9 は非線型光学結晶 5 をポンプするためのポンプ光を発生するレーザーである。非線型光学結晶 11 では、ポンプ光の光子一つが確率的に 2 つの光子に発生するパラメトリック蛍光対が発生する。そのうちの一つの光子（ここでは、アイドラー光子と呼ぶ）は、光検出器およびゲートコントロール装置 49 により検出され、検出した場合はもう一方の光子（シグナル光子と呼ぶ）が通過するようにゲート装置 4 を開く。

しかし、従来の技術においては、次のような問題があった。

まず第一に、従来の方法では、検出器の反応時間内に光子対が 2 つ発生していた場合には、ゲート操作によって、2 つのシグナル光子が射出され、パルス内に 2 つの光子が存在する場合がある、という欠陥があった。

また、従来の方法においては、パルス内部での光子発生タイミングを制御することはできなかった。

また、光子の到着を検出する検出器が、光子を検出していないにもかかわらず雑音などによりパルスを出力するいわゆる「ダークカウントパルス」を発生した場合、射出光子が存在しないような不在の光パルスを出力することになり、効率が悪かった。

この発明は、このような問題点を解消するためになされたもので、パルス内にただ 1 つの光子を発生させることを目的とする。

また、検出器のダークカウントパルスによる不在の光パルスの発生を低減させることを目的とする。

また、パルス内部において、光子発生を特定のタイミ

ングで発生させることを目的とする。

### 発明の開示

この発明に係る単一光子発生装置は、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源と、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器と、クロック発生器と、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えたものである。

また、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源と、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器と、クロック発生器と、そのクロックによって規定される一定時間内の最初の光子検出器からの信号に対してのみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部と、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えたものである。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の単一波長  $a$  に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を設けたものである。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の波長  $a$ 、 $b$  に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を

備えたものである。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質を備えることを備えたものである。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、擬似位相整合型非線型光学媒質を備えたものである。

また、シグナル光子の射出を制御するゲート装置として、開閉時間より短い時間差で開閉する複数のシャッターを備えたものである。

また、光子対から発生したシグナル光子を、その光子の射出を制御するゲート装置に到達させる光ファイバーを備えたものである。

この発明においては、アイドラー光子の光子の入射を光子検出器によって検出し、クロック発生器からのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみシグナル光子の射出を制御するゲート装置を開閉する。

また、アイドラー光子の光子の入射を光子検出器によって検出し、クロック発生器からのクロックによって規定される一定時間内の最初の光子検出器からの信号に対してのみシグナル光子の射出を制御するゲート装置を開閉する。

また、ポンプ光光源からのポンプ光を入射させ、非線型光学媒質によって発生する発生時刻に相関をもつ光子対をアイドラー光子とシグナル光子として用いる。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質の設置に当たり、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度を、そのチューニングカーブがある特定の単一波長  $\lambda$  に

対応する直線に接するような角度に設定する。

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質の設置に当たり、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の波長  $a$ 、 $b$  に対応する直線に接するような角度に設定する。

また、ポンプ光を導波路型の非線型光学媒質に入射する。

また、ポンプ光を擬似位相整合型非線型光学媒質に入射する。

また、シグナル光子の射出を開閉時間より短い時間差で開閉する複数のシャッターからなるゲート装置によって制御する。

また、光子対から発生したシグナル光子を、光ファイバーを用いてその光子の射出を制御するゲート装置に到達させる。

#### 図面の簡単な説明

図 1 はこの発明の一実施の形態の全体構成図、図 2 はこの発明の一実施の形態の構成図、図 3 は非線型光学媒質で発生する光子の波長と放出角度の関係を示す図、図 4 はこの発明の一実施の形態の動作を説明するための図、図 5 はこの発明の一実施の形態の動作を説明するための図、図 6 はこの発明の一実施の形態の全体構成図、図 7 はこの発明の一実施の形態で使用するゲート装置部の構成図、図 8 はこの発明の一実施の形態で使用するゲート装置部の動作を説明するための図、図 9 は従来技術の一例の全体構成図である。

### 実施の形態 1

図 1 はこの発明の一実施の形態の全体構成図である。図 1 において、1 は発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、2 はアイドラー光子 5 を検出する光子検出器、3 は光子検出器から発生するシグナルパルスを微分する微分回路、8 は微分回路 3 からの信号およびクロック発生部 7 からの制御クロックに対応してゲート装置 4 を制御するゲート装置制御部である。

図 2 に、この実施の形態の詳細な構成を示す。この実施の形態では、クロック内の特定のタイミングで、単一光子のみが含まれるような光パルスを効率よく発生させるものである。

#### (光子対発生器の説明)

図 2 において、9 は非線型光学媒質 11 をポンプするポンプ光 10 の光源である。非線型光学媒質 11 では、ダウンコンバージョンによってポンプ光 10 の波長  $\lambda$  の 2 倍の波長  $2\lambda$  をもつアイドラー光子 5 とシグナル光子 6 が発生する。本実施の形態では、ポンプ光源 9 として 351.1nm の波長をもつアルゴンレーザーを用いている。このとき、アイドラー光子 5 とシグナル光子 6 は、互いに発生する光子のエネルギーの和が、351.1nm の波長の光子のエネルギーに等しい対、つまりそれぞれ 702.2nm の波長の光子としてそれぞれ発生する。

特願平 9-353078 の「光子ビーム発生装置」に詳しく記載されているように、非線形光学媒質 11 の光学軸を、ポンプ光 10 に対してある特定の角度に設定することにより、発生するアイドラー光子 5 とシグナル光子 6 を、ビーム状に、かつ、高効率で発生させることが可能である。



図 3 に、 $\beta$ -Barium-Boron-Oxide (BBO) 結晶の光学軸が、ポンプ光に対して 50.4 度の角度に設定されている場合のチューニングカーブを示す。図 3 において、横軸は発生している光子の波長を、縦軸は、ポンプ光の入射方向に対する光子の出射方向を示している。図に見られるように 2 つのチューニングカーブが波長 702.2nm に対応する直線に接している。この条件においては、それぞれ波長 702.2nm の蛍光対がそれぞれプラス 3 度とマイナス 3 度の方向にビーム状に射出される。このような非線型光学媒質を用いることにより、ポンプ光の入射パワーに対して効率よく光子対を発生し、結果として同等のレートで単一光子を発生する場合に、装置の消費電力を低く押さえることができる。

アイドラー光子 5 は、レンズ 15 によって集光され、波長  $2\lambda$  の光子を選択的に透過するフィルタ 17 を通して光子数検出器 2 に集光される。

(光子検出器の説明)

この実施の形態では光子検出器 2 として、SEIKO EG & G 社製の SPCM-AQ を用いた。この光子検出器は、受光素子としてアバランシェフォトダイオード (APD) をアクティブクエンチングのガイガーモードで駆動したものである。APD は、ある一定電圧 (ブレイクダウン電圧) 以上の電圧を印可すると、単一の光子が入射しただけでも、それにより誘起された内部キャリアが印加電圧によって加速され他のキャリアを励起する過程が終わることなく繰り返されるブレイクダウン状態になる。このままでは次の光子の入射を検出することができない。クエンチングとは、光子の入射によるブレイクダウン状

態の発生を検出した場合、APDへの印加電圧をブレークダウン電圧以下に下げてブレークダウン状態を終了させ、次の光子の入射を検出できるようにすることである。電圧供給部分に、単に直列抵抗などの受動素子を挿入してそのような効果を持たせた場合をパッシブクエンチングと呼び、増幅器等を用いてそのような制御を能動的に行う場合をアクティブクエンチングと呼ぶ。SPCM-AQでは、光子が入射してから次の光子が検出できるようになるまでの時間である検出器の不感時間（dead time）は100ns程度、出力パルス幅は9ns程度である。もちろん、パッシブクエンチングの光子検出器を用いることも可能である。

（制御方法の説明）

アイドラ光子5が光子検出器2に入射した場合の、ゲート装置4の制御のための、微分回路3、クロック発生部7、およびゲート装置制御部8の動作について、図4を用いて説明する。図4において、18はクロック発生部から出力されるクロックパルス、19はアイドラ光子5の光子検出器2への入射時刻を示すグラフ、20は検出器2から出力されるシグナルパルスの様子を示すグラフ、21は微分回路からの出力信号を示すグラフ、22はゲート装置制御部からの出力信号等を示すグラフである。

本実施の形態では、18に示されるクロックパルスが立ち上がったから一定時間 $\tau$ の間に、光子が1つだけ含まれるような光パルスを出力し、それ以外の時間は光子を出力しないような動作が実現されている。

アイドラ光子5は、時間 $\tau$ の間に発生する確率が十分高くなるように設定する。つまり、アイドラ光子の発生

高くなるように設定する。つまり、アイドラ光子の発生光子数を毎秒平均  $N$  個とした場合、 $N > 1 / \tau$  となるように設定する。時間  $\tau$  は光子出力の周期性の指標となるものであり、周期性を高めるには  $\tau$  を小さく設定し、それに応じて  $N$  を大きく設定すればよい。

19にみられるような各時刻のアイドラ光子の入射に伴い、20にみられるようなシグナルパルス列が検出器 2 から出力される。たとえば光子の入射が時刻 23に起こった場合、それに応じて検出器 2 からはパルス 25が出力されるが、その直後の時刻 24に入射した光子に対しては、検出器の不感時間以内であればパルスは発生しない。発生したパルス 25は、微分回路を経て26のような微分信号に変換される。ゲート装置制御部をトリガする信号としては、光子検出器からの出力パルス 25を直接用いることも可能ではあるが、このような微分信号 26をトリガとして用いることにより、シグナルパルス 25の形状の揺らぎによる光子検出時刻の揺らぎを抑えることができる。

ゲート装置制御部 8 では、クロックパルス 18の立ち上がり後、最初の微分信号 26のトリガのみに応じて、短い時間  $\delta$  だけゲート装置 4 を開放する制御信号 27が生成される。アイドラー光子 5 に対応したシグナル光子 6 のゲート装置 4 での透過時刻は、グラフ 22で点線および実線の棒で示されている。アイドラ光子 5 によるシグナルパルス 20は、電子回路の信号処理時間だけ遅れているので、シグナル光子 6 も遅延手段によって同じ時間だけ遅延させるが、図 4 ではこれを省略して示している。ゲート装置 4 では、シグナル光子 28は透過できるが、ゲート装置の開放時間  $\delta$  を短くすることにより、引き続くシグナル

の射出を抑制することができる。次のクロックでは、同様にシグナル光子 30 が射出される。

このシグナル光子 6 は、レンズ 15 によって集光され、波長  $2\lambda$  の光子を選択的に透過するフィルタ 16 を通しながら、光ファイバ 12 へと集光される。14 は、光ファイバ 12 へシグナル光 6 を効率的に入射するための、微動装置である。

光ファイバ 12 の長さは、光子がゲート装置 4 へ伝達するのに、図 4 を用いて説明したような信号処理に要する時間だけ必要となるように設定される。その時間の微調整は、光ファイバ 12 の長さの調整でも、またゲート装置制御部 8 等に設けられた信号遅延器によっても可能である。

以上のような構成により、クロックパルスが立ち上がってから一定時間  $\tau$  の間に、光子が 1 つだけ含まれるような光パルスを出力し、それ以外の時間は光子を出力しないような単一光子源を実現した。

ここで、図 4 に示したクロック信号 18、シグナルパルス 25、制御信号 27 や微分信号 26 を外部へ出力することは大変に有用である。クロック信号 18 は、量子暗号通信システムの全システムを制御する信号として使用することができる。また、クロック発生部 7 を外部から供給されるクロックによりまかなう、もしくは同期させることも可能である。

また、量子暗号通信システムにおける光子の受信者は、シグナルパルス 25 や微分信号 26 を用いて受信機側のゲート装置の開放時間を短かくすることにより、信号光子をその他のノイズ信号から分離して受信することが可能に

なる。

この実施の形態では、クロック開始から1つ目の光子のみを透過させたが、クロック18でセットされ、出力パルス数があらかじめ設定した数Nに達したときにリセットされるプリセットカウンタを用いれば、クロック内でN個の光子を出力するようにすることも可能である。この場合、一定時間にN個の光子が含まれるような状態を生成することができる。

この実施の形態においては連続発振光（CW光）を、ポンプ光10として用いたが、パルス光をポンプ光として用いることも可能である。また、非線型光学媒質11の前後にポンプ光を反射する鏡を設置しキャビティを構成することにより、より効率的にアイドラ光子5およびシグナル光子6を発生させることも可能である。

## 実施の形態2

実施の形態1においては検出器2として、アクティブクエンチング制御のAPDを用いたが、ブレイクダウンを越える電圧を常時APDに印加するのではなく、一定時間だけ印加することも可能である。この場合の制御の様子を図5を用いて説明する。図5において、31はAPDに加えられる印加電圧の時間変化を示すグラフ、32はAPDからのシグナルパルスを示すグラフ、33は微分回路3から出力される微分信号を示すグラフである。

実施の形態1においてアクティブクエンチングについて説明した部分で述べたように、APDにブレイクダウン電圧よりも高い電圧が印加された場合、一光子の入射に対して無限大の増倍率をもち、APDの出力は飽和したブレイクダウン状態になる。この実施の形態では、こ

の A P D への印加電圧を、クロック 18 に応じて制御する。

18 に見られるクロックの立ち上がりから時間  $\tau$  程度の間だけ、印加電圧をブレイクダウン電圧より高い状態 (34) にする。その間、光子が入射すると同時に A P D はブレイクダウン状態になり出力は飽和し、その状態は印加電圧がブレイクダウン電圧より低くなるまで持続する。このため、A P D からは 35 のような出力パルスが得られる。その微分信号 36 の立ち上がりによりゲート装置制御部 8 をトリガし、単一光子を切り出すことが可能になる。

アクティブクエンチング制御の A P D を用いる場合、その不感時間やパルス長さはクエンチングに使用する回路による制限から、短くすることは困難であり、1 クロック時間を検出器の不感時間やパルス長さより短くすることが困難であったが、この方法では、それよりも短いクロック時間を実現することが可能である。

### 実施の形態 3

実施の形態 1 においては、発生するシグナル光の波長は 702.2nm であったが、この波長は適切な非線型光学媒質を選択することにより任意に変えることができる。たとえば、光ファイバーを用いた通信に一般に用いられている、1550nm 付近、1310nm 付近、また 800nm 付近の波長を発生させることも可能である。

実施の形態 1 (図 3) に示した光子対の発生方法は、波長が等しく角度の広がり小さい光子対ビームを得るのに適した方法であるが、別の目的に対しては、B B O 結晶の光学軸方向を変えることにより、波長の異なる光子対を得ることもできる。この場合には、図 3 の 2 つのチューニングカーブはそれぞれ異なる波長に対応する直

線に接する。この場合にも、光子の取り出し方向は、図 3 に示したチューニングカーブがそれぞれの波長に対応する直線に接する角度で取り出す。この条件によれば、一般に円錐状に広がる光子が一本のビームにまとまり、分布密度の高い光子ビームが得られる。

本発明のこのようなその他の実施の形態としては、図 2 において、ポンプ光源 7 として半導体励起 Y a g レーザーのアップコンバージョンレーザーを用いて 532nm のポンプ光 8 を発生させ、シグナル光子 6 として 1310nm の光子を、アイドラー光子 5 として 896nm の光子を発生させる装置がある。このとき、特願平 9-353078 の「光子ビーム発生装置」に詳しく記載されているような方法で、非線型光学媒質の光学軸のなす角度を、そのチューニングカーブがそれぞれ 1310nm と 896nm で接するような角度に設定し、光子対の発生効率を高めている。また、このようにアイドラー光子の波長を可視光の波長に近い近赤外域に設定することにより、光子数検出器 2 の量子効率が高い状態で光子数の検出が可能になっている。

このような構成により、光ファイバー中での伝送損失の小さい 1310nm 付近の光子を、クロックパルスが立ち上ってから一定時間  $\tau$  以内に 2 光子が密集して存在しないようにして発生させることが可能になった。また、本実施の形態においては、結晶の角度を上記のように設定することにより効率よく光子対を発生させることが可能になり、また、アイドラー光子の光子数の高い検出効率を維持することが可能になっており、結果として装置の消費電力を減少することができた。

実施の形態 4

本発明のその他の実施の形態を図6に示す。この実施の形態において、9は導波路型非線型光学媒質38をポンプするポンプ光源、37はポンプ光をファイバー中を導波させる光ファイバ、39は導波路型非線型光学媒質38から発生した蛍光対とポンプ光とを分別する導波路型フィルタ、40はポンプ光の射出口、41は蛍光対を2つの分岐に分別する導波路型フィルタである。

この実施の形態では、パラメトリック蛍光対は導波路型非線型光学媒質38において発生する。蛍光対は、それぞれ縦、横の偏光を持っており、偏光ビームスプリッターとして動作する導波路型フィルタ41において、そのうちの一方の偏光をもつものが光子数検出器2へ、もう一方が光ファイバ12へと伝達される。

このような構成により、装置を小型化することが可能になり、また、光学的アライメントが不要になった。

この実施の形態では、導波路型非線型光学媒質38として、疑似位相整合型非線型光学媒質を用いる。日本物理学会講演概要集第53巻第2号第2分冊341ページの佐中らによる「光導波路型非線型素子による2光子相関現象I」によって述べられているように、疑似位相整合型の導波路型非線型媒質では、使用するポンプ光と発生する光子が平行に発生するような条件を満たすような非線型性を、疑似位相整合により得ることが可能になる。

これにより、ポンプ光と発生光子の波長を任意に選択することが可能になった。

もちろん、この実施の形態においても、ポンプ光源9としては、パルス光源およびCW光源を用いることが可能である。また、導波型非線型光学媒質38の前後にポンプ



光を反射する鏡を設置しキャビティを構成することにより、より効率的にアイドラ光子およびシグナル光子を発生させることももちろん可能である。

#### 実施の形態 5

その他の実施の形態として、図 2 におけるゲート装置 4 にシャッターを 2 つ備えたものを図 7 に示す。図 7 において、12 はシグナル光子のゲート装置への到達時刻を遅延させるための光ファイバ、43、45 は電気光学素子、42、44、46 は偏光板、47 はノットゲート、48 は遅延器、8 はコントロール装置である。このとき、偏光板 44 および 46 は、偏光板 42 を通過した光の偏光に対して最大の透過率を持ち、それと直交する偏光をもつ光は透過しないように設定する。また、電気光学素子 43 と 45 は、与えられる制御信号の論理が 1 であれば偏光を 90 度回転し、0 であれば偏光を回転しないものとする。偏光板の対と、それらに挟まれた偏光を回転させる電気光学素子によって、シャッターを構成することが可能であるが、この実施の形態においては偏光板 44 が、それら 2 つのシャッターで共用されている形である。

ゲート装置はできるだけ、光子が存在している間のみの開の状態を保ち、それ以外の間は閉であることが望ましい。しかし、その応答時間の短さが特徴である電気光学素子でも、単体では、そのゲート時間はその電気光学素子の繰り返し応答時間によって規定される時間以下には設定できなかった。この実施の形態は、ゲート装置を 2 つ備えることにより、ゲート装置の繰り返し応答時間より短時間でのゲート操作を実現した。

このゲート回路の動作を、図 8 を用いて説明する。図

8 において、横軸は時間を表す。一番上のグラフは、ゲート操作部に目標とする光子数の状態が到達している確率を、グラフ A は、図 7 の A 点での信号を、グラフ B は同様に図 7 の B 点での信号の状態を表す。A はコントロール装置からの制御信号そのものと考えてよい。電気光学素子 45 は偏光子 44、46 との組み合わせにより論理 0 が入力されているときは光子を透過させ、また論理 1 が入力されているときは光子を遮蔽する。

電気光学素子 43 も、偏光子 42 と 44 との組み合わせにより同様に働く。

図 8 のグラフ A の時刻  $T_0$  における状態のように、コントロール装置からの制御信号は常時は 1 に設定する。この場合、電気光学素子 45 によって、ゲート装置としては光子を透過させない。このとき、電気光学素子 43 には、ノットゲート 47 によって論理 0 が入力されており、光子を透過させる。

コントロール装置 8 は、偏光を光子がゲート操作部に到達すると予測される直前の時刻  $T_1$  に電気光学素子 45 が開になるように、出力の論理を 1 から 0 に変化させる。このとき、遅延器 48 の働きにより、電気光学素子 43 は論理 0 のままである。このとき、光子はゲート装置を透過可能になっている。この状態は遅延器によって設定された時間の間継続する。その遅延の後、 $T_2$  において電気光学素子への論理が 1 にフリップし、電気光学素子 43 によって構成されるシャッターを光子は透過できなくなる。時刻  $T_3$  で、制御信号は再び 0 から 1 へと変化し、電気光学素子 45 は閉の状態に遷移し、 $T_4$  で初期状態に戻る。

以上のような構成により、非常に短い時間だけゲート

装置を開くことが可能になり、必要な光子のみを選択的に射出することが可能になった。

この実施の形態においては電気光学素子を用いてシャッターを構成したが、もちろんその他のシャッターを用いることもできる。たとえば、光－光スイッチを用いれば、より高速なシャッター動作を実現できる。また、音響光学素子を用いた場合、その繰り返し速度より高速なシャッターを安価に構築できる。機械式シャッターを用いることも可能である。

本発明の第1の構成にかかわる単一光子発生装置は、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えているので、クロックパルスが立上ってから一定時間内に特定の数を下回る数の光子を発生することができる。

本発明の第2の構成にかかわる単一光子発生装置は、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内の最初の光子検出器からの信号に対してのみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えているので、クロックパルスが立上ってから一定時間内に1個の

みの光子を発生することができる。

本発明の第3の構成にかかわる単一光子発生装置は、第1、第2のいずれかの構成において、前記光子対源として、ポンプ光光源と、前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質を備えているので、クロックパルスが立上ってから一定時間内に特定の数を下回る数の光子または1個のみの光子を効率よく発生させることができる。

本発明の第4の構成にかかわる単一光子発生装置は、第3の構成において、前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の単一波長 $a$ に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えているので、特定の単一波長の光子対を効率よく発生させることができる。

本発明の第5の構成にかかわる単一光子発生装置は、第3の構成において、前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の波長 $a$ 、 $b$ に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えているので、特定の2つの波長の光子対を効率よく発生することができる。

本発明の第6の構成にかかわる単一光子発生装置は、第3の構成において、前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質を備えているので、光学的な調整が不要な小型の単一光子発生装置が実現できる。

本発明の第7の構成にかかわる単一光子発生装置は、第3～6のいずれかの構成において、前記ポンプ光が入

射する非線型光学媒質として、擬似位相整合型非線型光学媒質を備えているので、ポンプ光と平行な方向に光子対を発生させることができる。

本発明の第 8 の構成にかかわる単一光子発生装置は、第 1 ～ 7 のいずれかの構成において、前記シグナル光子の射出を制御するゲート装置として、開閉時間より短い時間差で開閉する複数のシャッターを備えているので、シャッターの開閉時間より短い時間で開閉するゲートを実現できる。

本発明の第 9 の構成にかかわる単一光子発生装置は、第 1 ～ 8 のいずれかの構成において、前記光子対から発生したシグナル光子を、その光子の射出を制御するゲート装置に到達させる光ファイバーを備えているので、ゲートの開閉時刻とゲートへのシグナル光子の到達時刻を一致させることができる。

#### 産業上の利用可能性

本発明にかかわる単一光子発生装置は、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えているので、クロックパルスが立上ってから一定時間内に特定の数を下回る数の光子を発生することができる単一光子発生装置として有用である。

## 請求の範囲

1. シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えることを特徴とする単一光子発生装置。
2. シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子の入射を検出する光子検出器、クロック発生器、そのクロックによって規定される一定時間内の最初の光子検出器からの信号に対してのみゲート装置を開閉するための信号を生成するゲート装置制御部、ゲート装置制御部からの信号に応じて開閉するゲート装置を備えることを特徴とする単一光子発生装置。
3. 前記光子対源として、ポンプ光光源と、前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求の範囲第1項記載の単一光子発生装置。
4. 前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の単一波長  $\lambda$  に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えることを特徴とする、請求の範囲第3項記載の単一光子発生装置。
5. 前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポ

ンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の波長  $a$ 、 $b$  に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えることを特徴とする、請求の範囲第 3 項記載の単一光子発生装置。

6. 前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求の範囲第 3 項記載の単一光子発生装置。
7. 前記ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、擬似位相整合型非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求の範囲第 3 項記載の単一光子発生装置。
8. 前記シグナル光子の射出を制御するゲート装置として、開閉時間より短い時間差で開閉する複数のシャッターを備えることを特徴とする、請求の範囲第 1 項記載の単一光子発生装置。
9. 前記光子対から発生したシグナル光子を、その光子の射出を制御するゲート装置に到達させる光ファイバーを備えることを特徴とする、請求の範囲第 1 項記載の単一光子発生装置。

FIG. 1

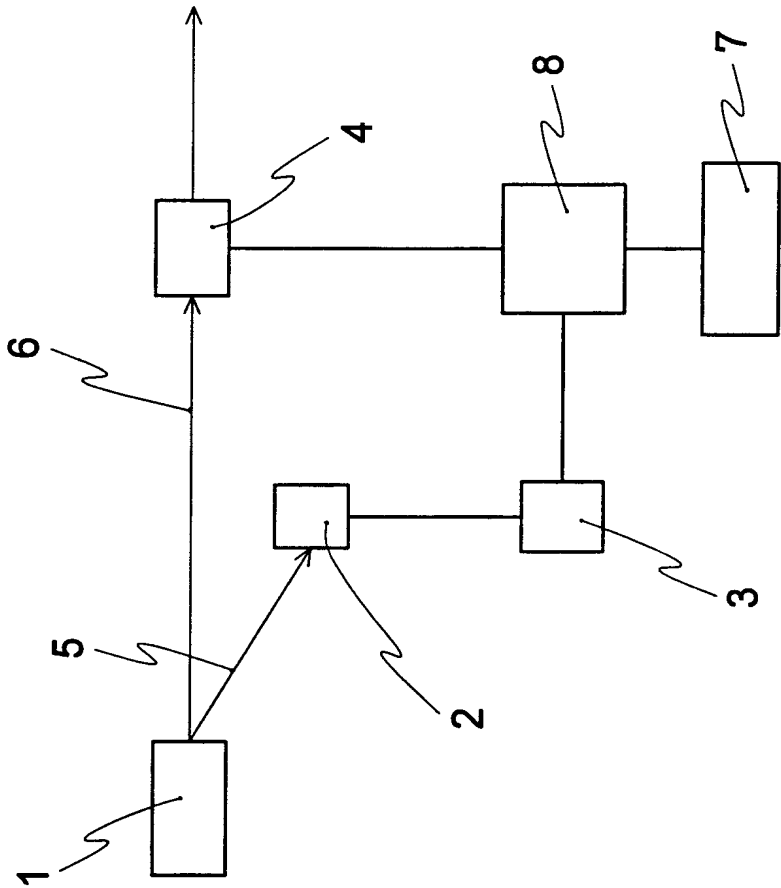




FIG. 2

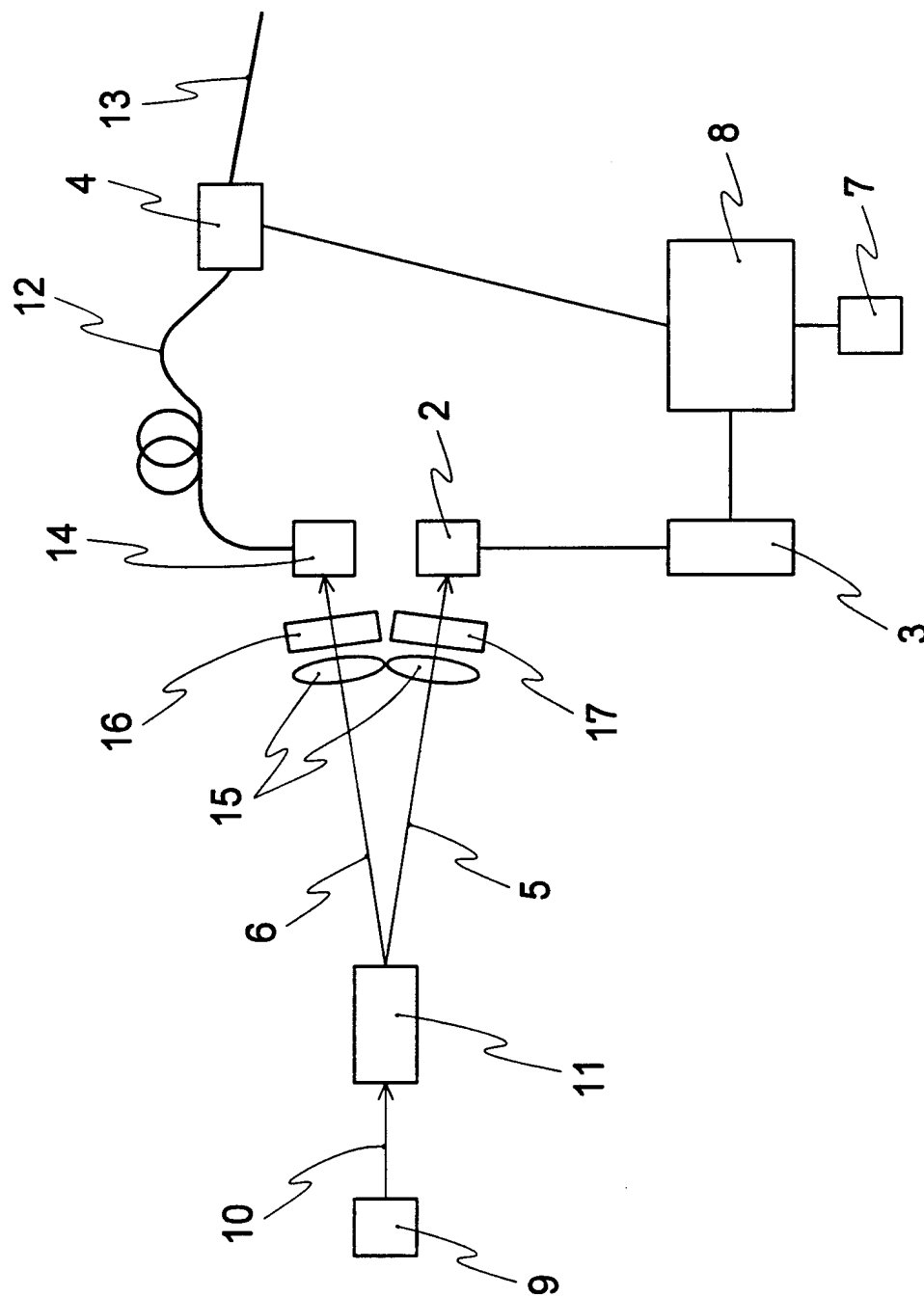


FIG. 3

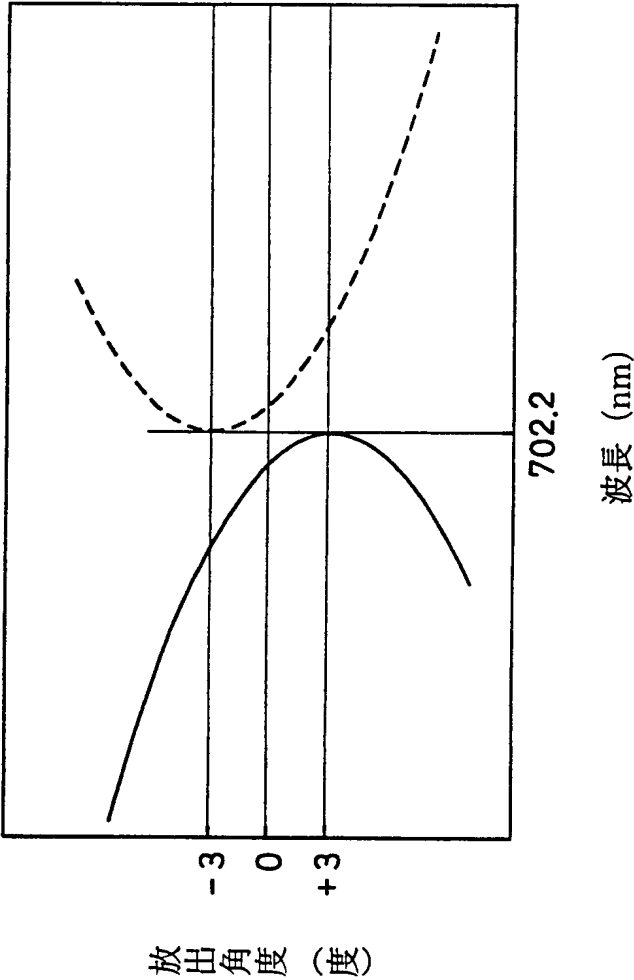


FIG. 4

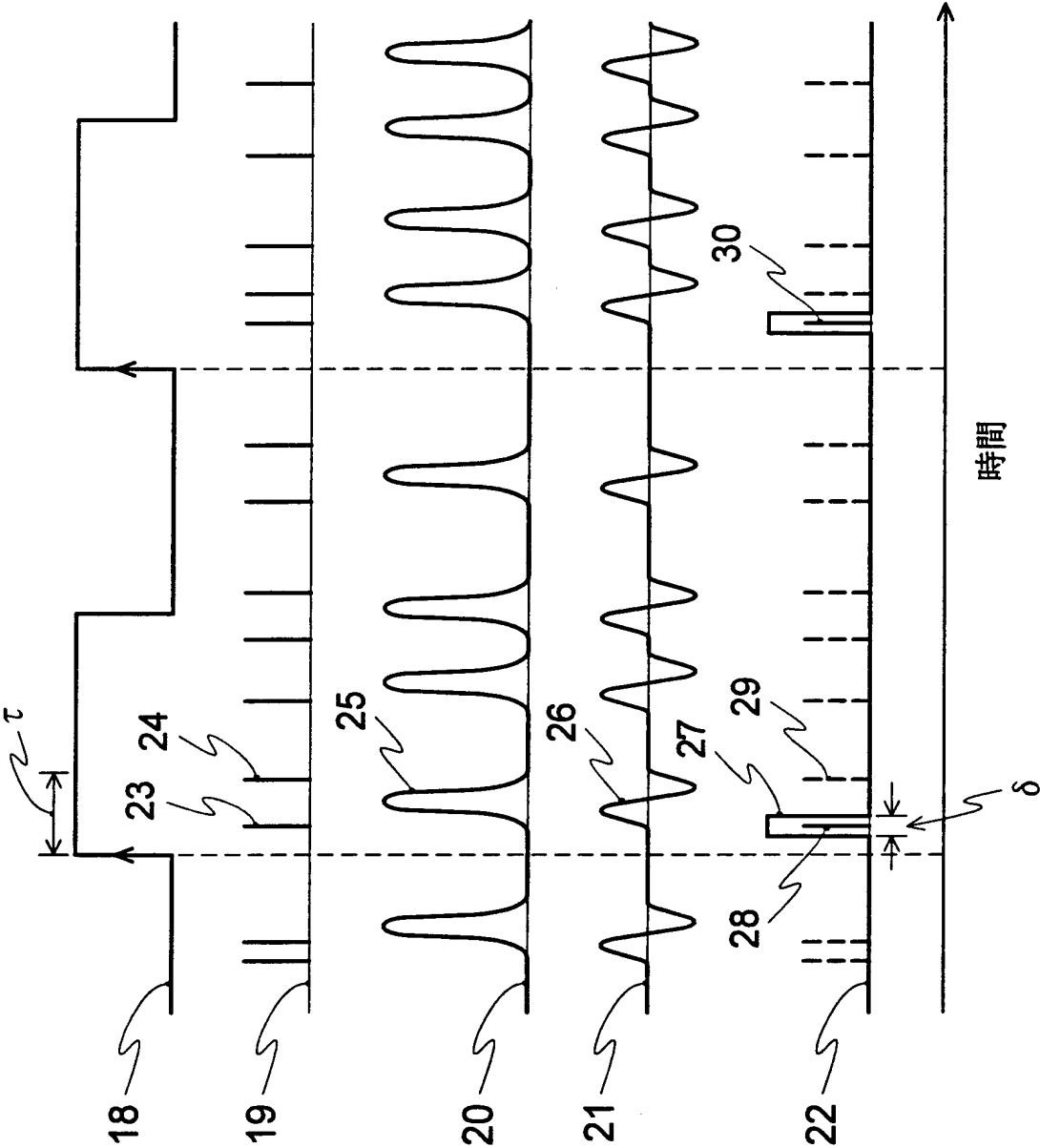


FIG. 5

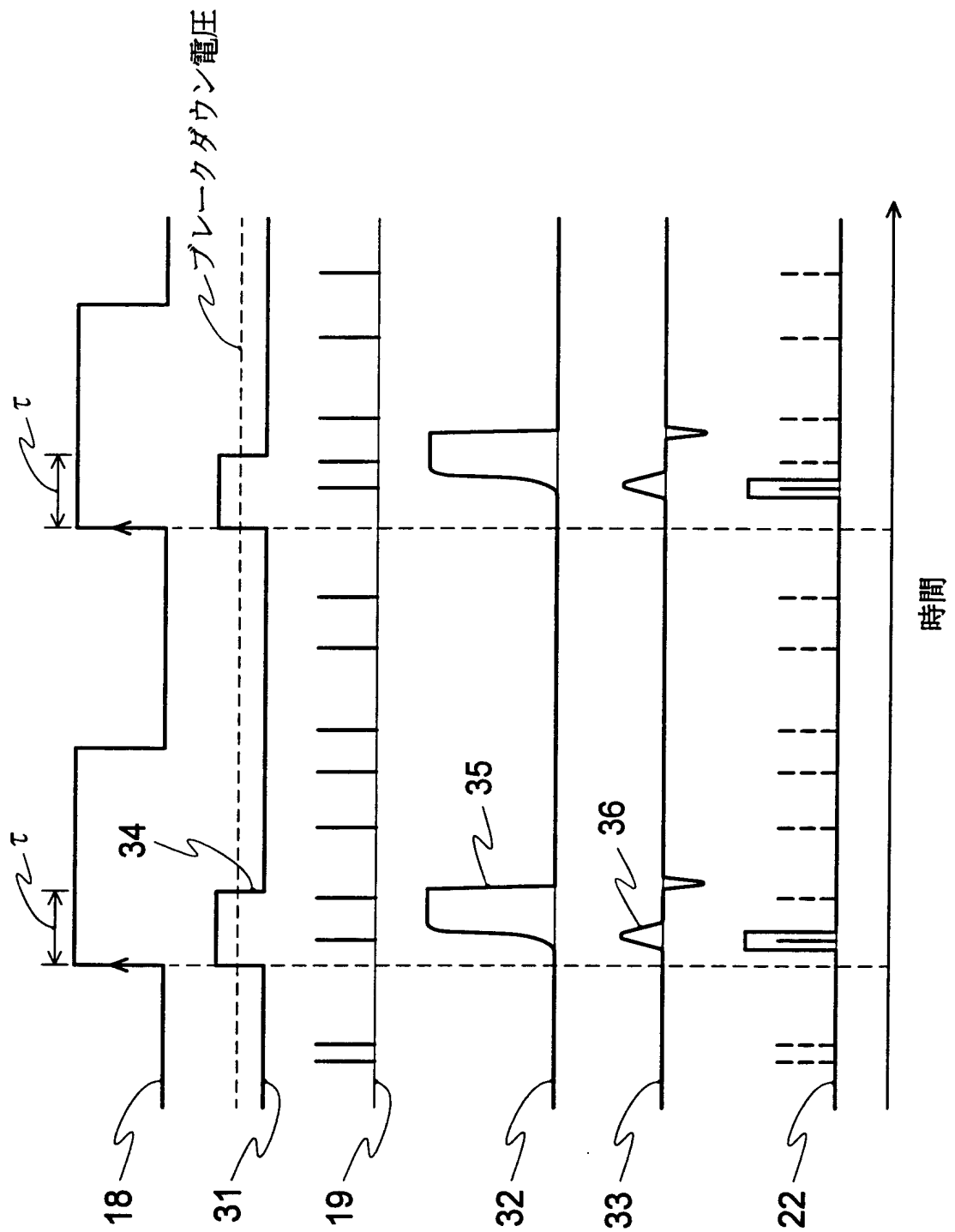


FIG. 6

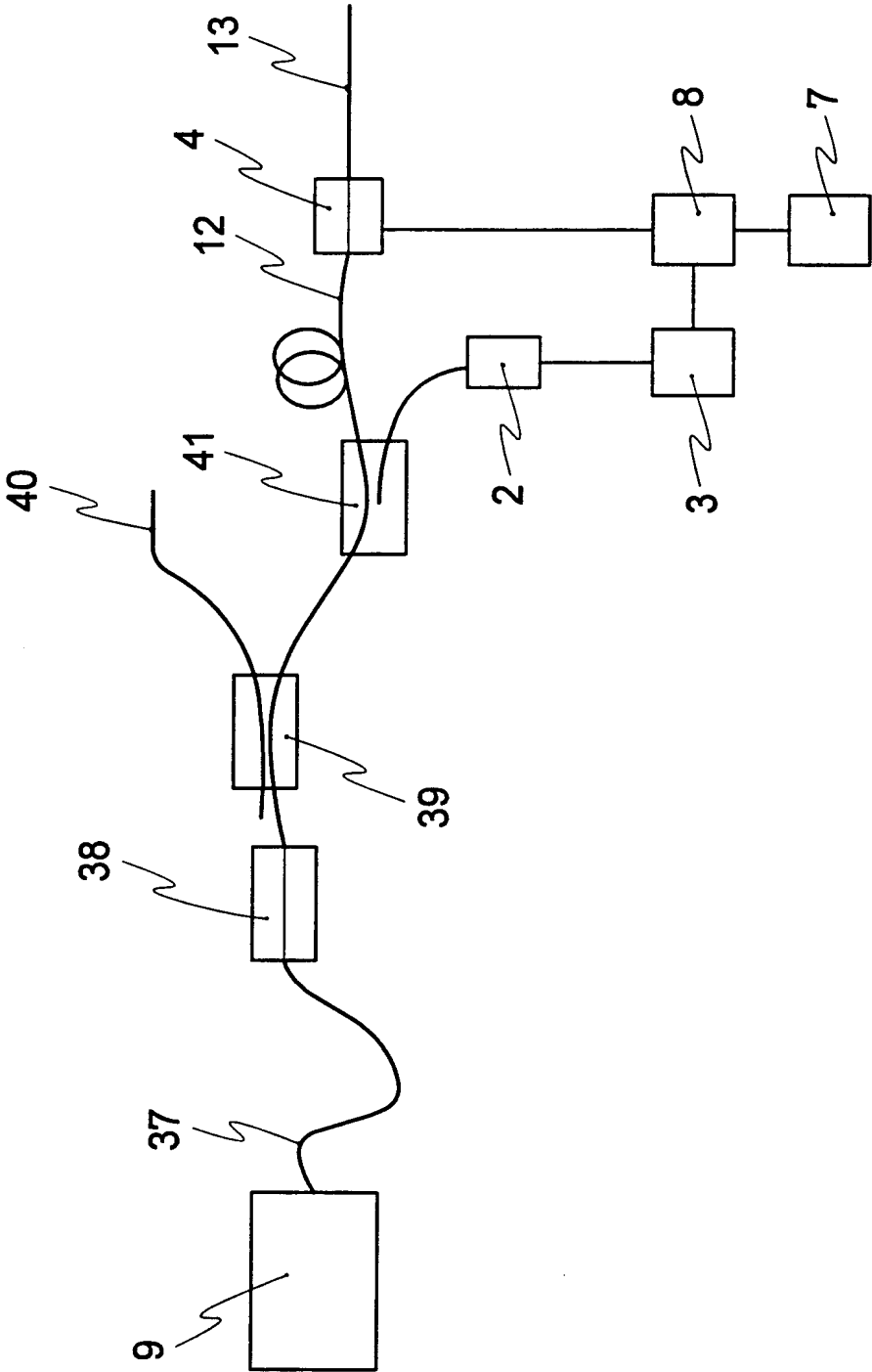
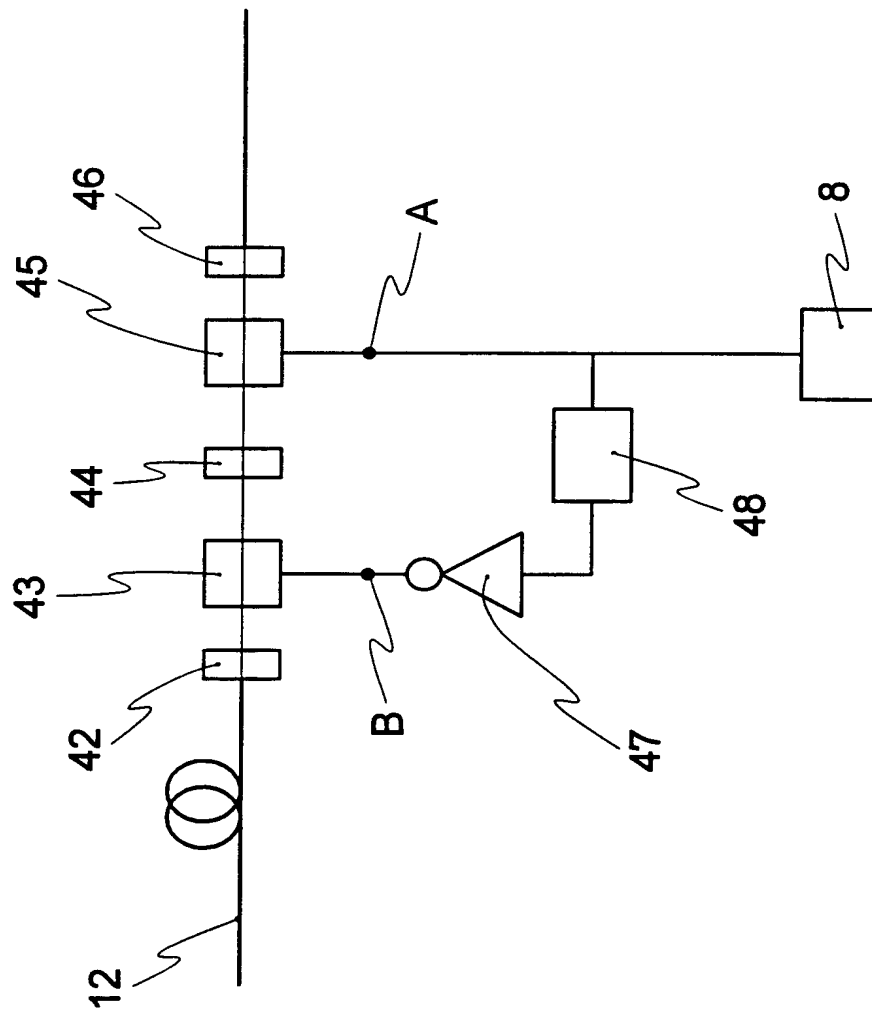


FIG. 7



8 / 9

FIG. 8

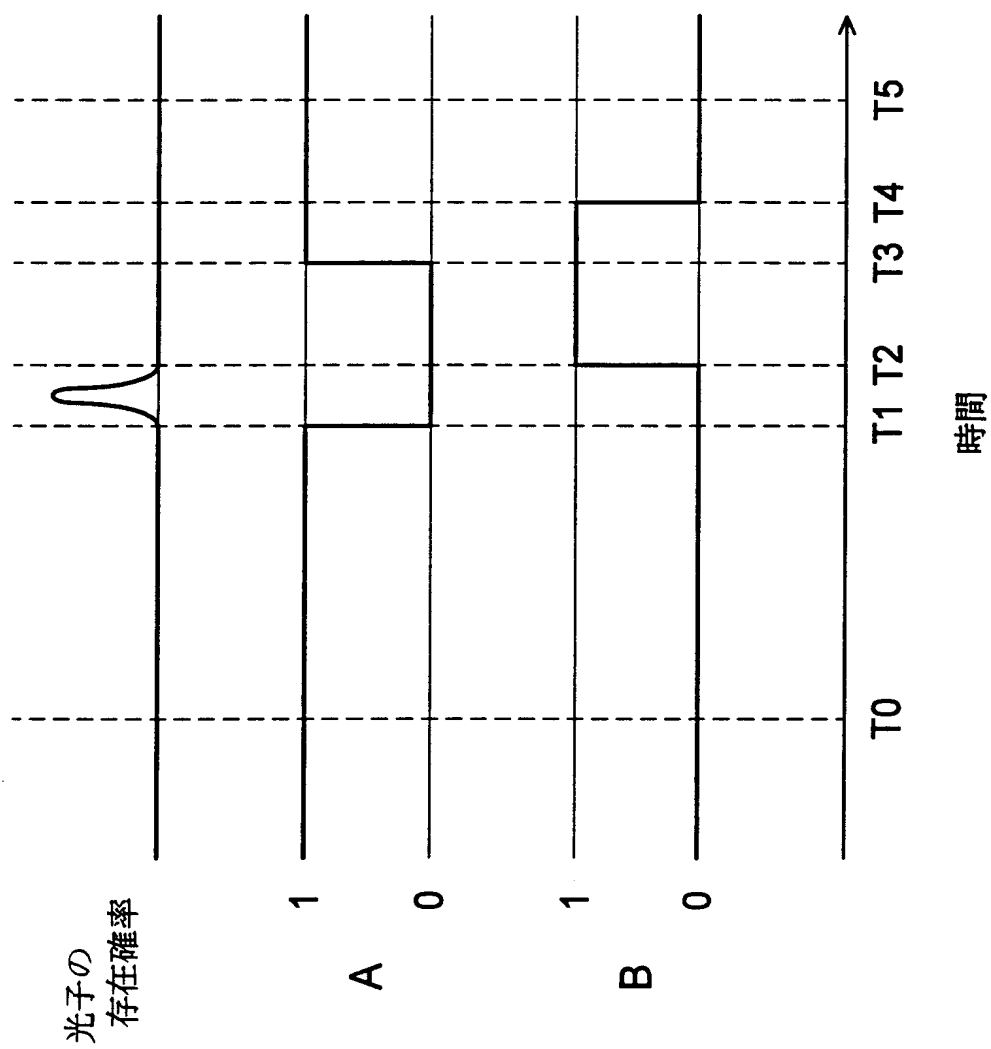
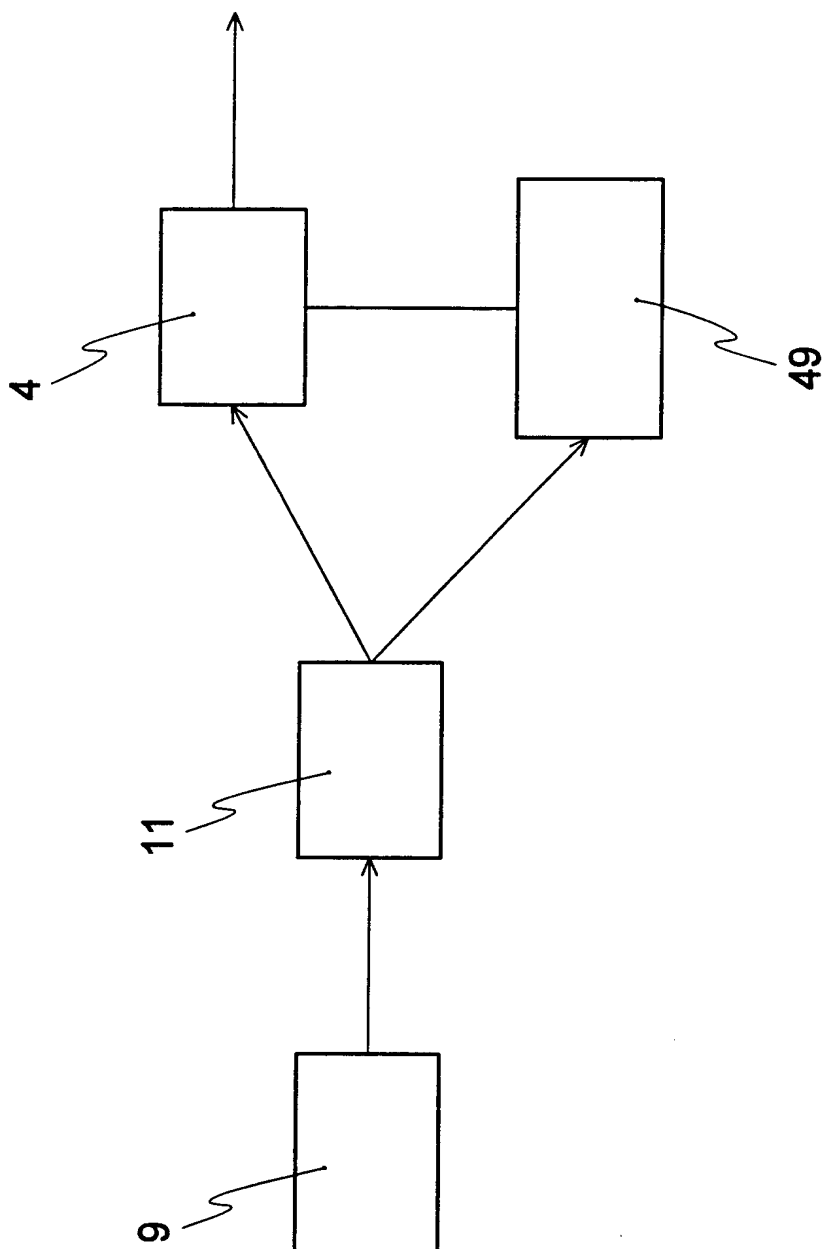


FIG. 9





# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/06245

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G02F 1/39, H04L9/38, H04L9/08, H04B10/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G02F 1/39, H04L9/38, H04L9/08, H04B10/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2000
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2000	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST  
WPI  
USPTO Web Patent Database

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US, 5675648, A (British Telecommunications public limited company), 07 October, 1997 (07.10.97), Column 5, lines 20 to 30; Fig. 5 & JP, 8-505019, A, page 11; Fig. 5 & WO, 9415422, A & AU, 9457099, A & EP, 676110, A & DE, 69309496, E & ES, 2101495, T3 & DE, 69408152, E & CA, 2152628, C	1-9
Y	Appl.Opt., Vol.33, No.10 (1 April 1994), P.G.Kwiat, A.M.Steinberg, R.Y.Chiano, P.H.Eberhard, M.D.Petroff, "Absolute efficiency and time-response measurement of single-photon detectors", pp.1844-1853	1-9
Y	JP, 08-190112, A (Nippon Telegr. & Teleph. Corp. <NTT>), 23 July, 1996 (23.07.96), Full text; Figs. 1 to 11 (Family: none)	1-9
Y	Abstracts, Meeting of Nippon Butsuri Gakkai, Vol. 53, No.1-2, 2p-YL-7, Shigeki Takeuchi, "Parametric Keiko Koshi Tai Beam no Hassei", p.292	4,5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search  
09 February, 2000 (09.02.00)

Date of mailing of the international search report  
29 February, 2000 (29.02.00)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/06245

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Abstracts Meeting of Nippon Butsuri Gakkai, Vol. 53, No.2-2, 27a-YQ-10, Kaoru Sanaka et al., "Hikari Doharogata Hi Senkei Soshi ni yoru 2 Koshi Soku Gensho", p.341	6, 7

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02F 1/39, H04L9/38, H04L9/08, H04B10/00

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02F 1/39, H04L9/38, H04L9/08, H04B10/00

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2000年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2000年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2000年

## 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICST

WPI

USPTO Web Patent Database

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	US, 5675648, A (British Telecommunications public limited company) 7.10月. 1997 (07.10.97), 第5欄第20-30行, 第5図 & JP, 8-505019, A, 第11頁, 第5図 & WO, 9415422, A & AU, 9457099, A & EP, 676110, A & DE, 69309496, E & ES, 2101495, T3 & DE, 69408152, E & CA, 2152628, C	1-9
Y	Appl. Opt., Vol. 33, No. 10 (1 April 1994), P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, R. Y. Chiano, P. H. Eberhard, M. D. Petroff, "Absolute efficiency and time-response measurement of single-photon detectors", p. 1844-1853	1-9

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09.02.00

国際調査報告の発送日

29.02.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

佐藤 宙子

2X

9316

印

電話番号 03-3581-1101 内線 3293

## C (続き) . 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP, 08-190112, A(日本電信電話株式会社), 23. 7月. 1996(23. 07. 96) 全文, 第1-11図 (ファミリーなし)	1-9
Y	日本物理学会講演概要集, 第53巻, 第1号, 第2分冊, 2p-YL-7, 竹内繁樹, " パラメトリック蛍光光子対ビームの発生" , p. 292	4, 5
Y	日本物理学会講演概要集, 第53巻, 第2号, 第2分冊, 27a-YQ-10, 佐中薫, 上妻幹男, 久我隆弘, " 光導波路型非線形素子による二光子相関現象 I " , p. 341	6, 7